

# Amplificador Criogénico MMIC de Bajo Ruido en Banda Q para Aplicaciones de Radioastronomía

J. Vicente Terán Collantes, Luisa de la Fuente, Beatriz Aja, Eduardo Artal

[teranjv@unican.es](mailto:teranjv@unican.es), [fuenterm@unican.es](mailto:fuenterm@unican.es), [ajab@unican.es](mailto:ajab@unican.es), [artale@unican.es](mailto:artale@unican.es)

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria.

Plaza de la Ciencia s/n, 39005. Santander, España.

**Abstract-** The design of a broad-band monolithic cryogenic low-noise amplifier (MMIC LNA) in the Q band, aimed to be used in radio-astronomy receiver front-end modules is presented. A 70 nm gate-length GaAs mHEMT process from OMMIC foundry is used to manufacture the amplifier. An accurate model for the minimum noise bias point of the transistor has been obtained at room temperature. The amplifier design is based on a four stage monolithic common source transistor configuration. At 300 K, the amplifier shows an associated gain of  $28 \pm 1.1$  dB and an average noise temperature of 145 K with a minimum noise temperature of 101 K at 45 GHz tested on wafer. When cooled down to 15 K, the average noise temperature is 18.4 K with a minimum of 13.5 K and 27.3 dB of associated gain. The DC power consumption is extremely low, 4.1 mW, at cryogenic temperature.

**Keywords**—Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC); Low Noise Amplifier (LNA); broadband amplifiers; cryogenic; GaAs mHEMT

## I. INTRODUCCIÓN

La comunidad científica demanda, en el campo de la radioastronomía, receptores cada vez más sensibles que permitan detectar y procesar señales muy débiles procedentes del cielo. Los amplificadores criogénicos de bajo ruido (LNA) juegan un papel muy importante dentro de los receptores puesto que amplifican la señal recibida directamente del cielo añadiendo un ruido muy bajo al ruido total del receptor [1]-[3].

La investigación en nuevos materiales ha conducido al desarrollo de transistores de alta movilidad de electrones (HEMT) en tecnologías semiconductoras de fosfuro de indio (InP) que permiten diseñar amplificadores con muy alta ganancia y muy bajo ruido [4]. Sin embargo, una baja estabilidad, alta fragilidad y un limitado acceso a esta tecnología, han promovido el desarrollo de HEMT metamórficos (mHEMT) en sustratos semiconductores de arseniuro de galio (GaAs), dopados con un alto contenido de InP en el canal. En los últimos años se han publicado muchos trabajos con excelentes resultados basados en estas estructuras mHEMT [5]-[9].

La tecnología monolítica se erige con una buena opción para el diseño en alta frecuencia, debido a que los tamaños de componentes, así como las interconexiones, están controlados de forma precisa. Además, se obtienen altos niveles de rendimiento durante la fabricación (yield). Sin embargo, esta tecnología tiene la desventaja de los costes asociados al proceso de producción para bajas cantidades. A veces, el alto coste puede no ser abordable.

Este artículo describe el diseño de un amplificador MMIC criogénico (LNA), en la banda de frecuencias de 33-50 GHz, de muy bajo ruido y consumo de DC. El proyecto dentro del que se engloba este trabajo se presenta en la sección II. El diseño del amplificador se describe en la sección III así como consideraciones del proceso tecnológico utilizado y el modelo pequeña señal del transistor. La caracterización de ruido y Scattering del amplificador a temperatura ambiente y de ruido y ganancia a temperatura criogénica se muestran en la sección IV. Finalmente, se recogen las conclusiones de este trabajo en la sección V.

## II. PROYECTO EPI

El proyecto EPI (Exploring Physic Inflation) se engloba dentro del experimento QUIjote (QUI joint Tenerife) cuyo principal objetivo es caracterizar la polarización del fondo cósmico de microondas (CMB). En este proyecto, el objetivo es diseñar y construir un radiómetro polarímetro en la banda de 35-47 GHz. Esta banda de frecuencias se ha elegido teniendo en cuenta la banda de frecuencias de funcionamiento del instrumento TGI (26-36 GHz) ya construido y evitando una temperatura del cielo demasiado alta (Fig. 1).

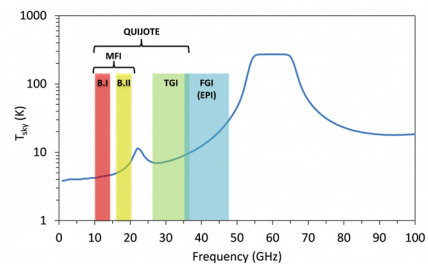


Fig. 1. Temperatura del cielo versus frecuencia.

El esquema más detallado del radiómetro se muestra en la Fig. 2. Se divide en dos partes, el módulo enfriado (FEM) que recibe y amplifica la señal débil procedente del cielo y, el módulo posterior (BEM) donde se realizan funciones de correlación y detección de la señal recibida a temperatura ambiente. El amplificador (Cryo-LNA en la Fig. 2) diseñado en este trabajo va situado en el FEM, justo detrás del ortomodo y las bocinas que captan la señal de entrada al radiómetro. Su misión es amplificar la señal procedente del cielo añadiendo el mínimo ruido posible. Para ello, el FEM va enfriado a temperatura criogénica.

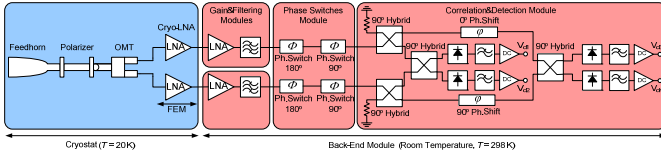


Fig. 2. Diagrama del radiómetro polarímetro de EPI.

### III. DISEÑO DEL MMIC LNA

#### A. Tecnología

Los transistores utilizados en el diseño son construidos en tecnología mHEMT de 70 nm de longitud de puerta de la fundición OMMIC (Francia). El dopado en el canal conductor del transistor es del 70 % de indio, proporcionando una frecuencia de transición  $f_T = 300$  GHz y una máxima frecuencia de oscilación  $f_{max} = 350$  GHz.

Para el diseño del amplificador se ha escogido un tamaño del transistor de  $4 \times 15 \mu\text{m}$  de periferia de puerta.

#### B. Modelos de pequeña señal y ruido para el transistor

Unos modelos precisos de pequeña señal y ruido son fundamentales para lograr el éxito en el diseño de un LNA. El modelo de pequeña señal para un transistor discreto de igual tamaño al utilizado en el diseño del amplificador se extrae a partir de medidas de DC y parámetros de Scattering. El punto de polarización para bajo ruido se obtiene siguiendo la aproximación descrita en [10].

En la Fig. 3 se muestra un esquema eléctrico del modelo pequeña señal utilizado. Los valores numéricos obtenidos para el mejor punto de polarización  $V_d = 0.6$  V e  $I_d = 6.7$  mA se recogen en la Tabla 1.

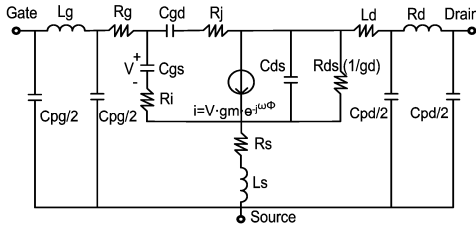


Fig. 3. Modelo pequeña señal para un mHEMT de OMMIC,  $4 \times 15 \mu\text{m}$ .

Tabla 1. Parámetros de pequeña señal para 70 nm mHEMT  $4 \times 15 \mu\text{m}$  de OMMIC,  $V_d = 0.6$  V e  $I_d = 6.7$  mA

Parámetro Intrínseco	Valor	Parámetro Extrínseco	Valor
Cgs	38 fF	Cpg/2	14.75 fF
Ri	7.5 $\Omega$	Lg	38.31 pH
Cgd	13.7 fF	Rg	0.5 $\Omega$
Rj	19 $\Omega$	Cpd/2	14.75 fF
gm	71 mS	Ld	40.75 pH
$\Phi$	0 ps	Rd	4.19 $\Omega$
Cds	17.5 fF	Rs	2.75 $\Omega$
gd	6.9 mS	Ls	4.84 pH

El modelo de ruido sigue el propuesto por Pospiezalski en [10]. Se realizan medidas de ruido del transistor sobre  $50 \Omega$  para estimar  $T_d$ , asumiendo que  $T_g$  es igual a la temperatura ambiente. En la Fig. 4 se muestran los resultados de la medida de ruido y el modelo obtenido, para el punto de polarización  $V_d = 0.6$  V e  $I_d = 6.7$  mA del transistor. El rizado que aparece en la medida es debido a la desadaptación que hay entre el transistor y la fuente de ruido. Se obtiene un valor de  $T_d = 3200$  K, fijando  $T_g = 300$  K.

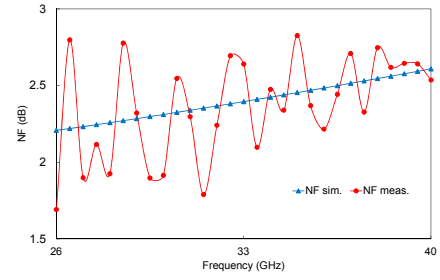


Fig. 4. Comportamiento en ruido sobre  $50 \Omega$  de un 70 nm mHEMT de OMMIC,  $4 \times 15 \mu\text{m}$ , a temperatura ambiente para  $V_d = 0.6$  V e  $I_d = 6.7$  mA.

#### C. Diseño del LNA

El MMIC LNA se basa en un diseño clásico de 4 etapas con transistores en configuración de fuente común. Todas las etapas tienen el mismo transistor de tamaño  $4 \times 15 \mu\text{m}$  y el mismo punto de polarización. En las dos primeras etapas del diseño se ha usado la técnica de realimentación en fuente para conseguir el mejor comportamiento en ruido, así como buena adaptación de entrada, mejorando a la vez la estabilidad.

Dado que la primera etapa es la más importante en términos de ruido, el diseño de la red de entrada se basa en líneas microstrip simples. Las redes de adaptación de las siguientes etapas se diseñan para conseguir buena planitud en la ganancia del amplificador manteniendo el ruido lo más bajo posible. El proceso de diseño y optimización se ha realizado usando el simulador electromagnético ADS Momentum de Keysight Technologies. Las redes de polarización son independientes para cada etapa y están formadas por una combinación de resistencias y condensadores que proporcionan filtrado. El esquema eléctrico del LNA se muestra en la Fig. 5.

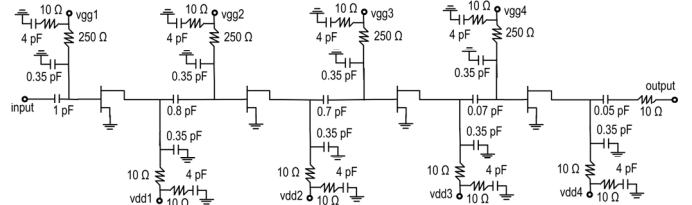


Fig. 5. Esquema eléctrico del MMIC LNA de 4 etapas.

En la Fig. 6 se muestra una fotografía del MMIC LNA fabricado.

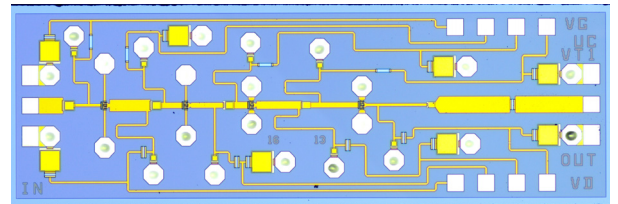


Fig. 6. Fotografía de MMIC LNA fabricado ( $3 \times 1 \text{ mm}^2$ ).

#### D. Conexión del MMIC LNA

Cuando el MMIC LNA se integra en un chasis es muy importante su interconexión con las líneas de acceso del propio chasis. La forma más habitual para realizar estas conexiones, en diseños de alta frecuencia, es soldando hilos de oro a los pad de entrada y salida del MMIC.

En la Fig. 7 se muestra una simulación de la respuesta en ganancia y ruido del MMIC para diferentes longitudes de hilos de interconexión en la entrada y salida, de 0 a  $600 \mu\text{m}$ . Se observa que la ganancia disminuye cuanto más largo es el hilo

de oro. En términos de ruido ocurre lo contrario, la figura de ruido aumenta a medida que el hilo se hace más largo. Este efecto, que introduce el carácter inductivo del hilo de oro, se hace más acusado cuanto más alta es la frecuencia.

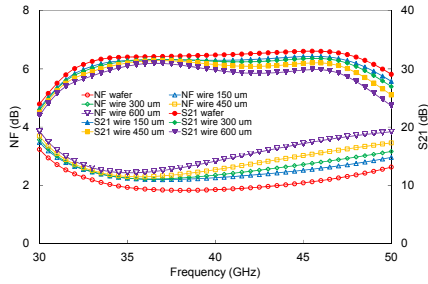


Fig. 7. Simulación de ganancia y ruido del MMIC LNA para diferentes longitudes de hilos de interconexión, de 0 a 600  $\mu\text{m}$  con paso 150  $\mu\text{m}$ .

A la vista de las simulaciones, los hilos de interconexión no debieran ser mayores de 300  $\mu\text{m}$  de longitud para tener buen comportamiento en ganancia y ruido.

#### IV. MEDIDA Y CARACTERIZACIÓN DEL LNA

##### A. Medidas en oblea a temperatura ambiente

En primer lugar se caracteriza el LNA a temperatura ambiente. Las medidas se realizan en una estación de sondas coplanar de Cascade Microtech. Para la caracterización en radio frecuencia (RF) se usa el analizador de redes E8364A de Keysight Technologies. Las medidas de ruido se realizan en el analizador de figura de ruido N8975A de Keysight Technologies usando el método del factor Y. Un conversor externo de frecuencia permite medir en la banda de frecuencias 33 – 50 GHz. Además se coloca un atenuador de 6 dB en la salida de la fuente de ruido (346C\_K01) para bajar el nivel ENR y mejorar así la precisión de la medida de ruido [11].

La Fig. 8 muestra la medida de parámetros de Scattering y, en la Fig. 9, se representan la medida de ruido y ganancia de inserción. El valor medio de la ganancia en la banda de frecuencias 33-50 GHz es 28.2 dB. Las pérdidas de retorno de entrada son mejores de 4 dB y las de salida son mejores de 11 dB en toda la banda. La temperatura media de ruido es 145 K en la banda de frecuencias 33-50 GHz, alcanzando un mínimo de 101 K a 45 GHz.

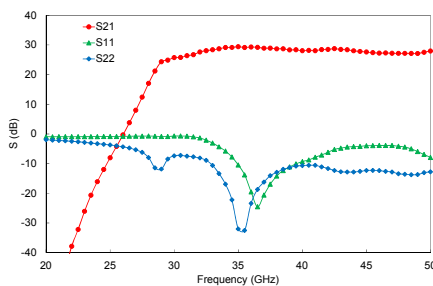


Fig. 8. Medida de los parámetros de Scattering en oblea del MMIC LNA a temperatura ambiente,  $V_d = 0.61\text{ V}$  e  $I_d = 24.9\text{ mA}$ .

El punto de polarización para obtener el mínimo ruido en el amplificador a temperatura ambiente es  $V_d = 0.61\text{ V}$  e  $I_d = 24.9\text{ mA}$ , con un consumo total de potencia en DC igual a 15.2 mW. Estos valores están muy cercanos al punto de polarización obtenido a partir de las medidas de un transistor discreto. Por lo cual se valida el modelo pequeña señal del transistor.

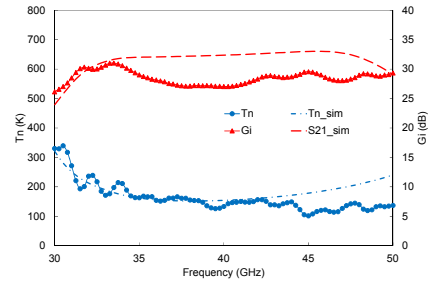


Fig. 9. Medida de los parámetros de Scattering en oblea del MMIC LNA a temperatura ambiente,  $V_d = 0.61\text{ V}$  e  $I_d = 24.9\text{ mA}$ .

##### B. Caracterización del LNA a temperatura criogénica

Para la caracterización del MMIC LNA a temperaturas criogénicas se ha mecanizado un chasis fabricado en aluminio para maximizar la conductividad térmica y reducir el peso total, y está niquelado y dorado.

El chasis tiene dos cavidades: una para el chip y las líneas de acceso de alta frecuencia con 1.2 mm de anchura, mientras que en la otra se colocan las redes polarización como puede observarse en la Fig. 10. Los accesos a la polarización son canales estrechos para evitar resonancias en la cavidad. El chasis se equipa con conectores coaxiales de 1.85 mm y, la transición entre estos conectores y las líneas de acceso microstrip se realiza a través de unos contactos correderos que permiten flexibilidad en las juntas durante los test criogénicos. Las redes de polarización fuera del chip están formadas por condensadores, resistencias y, diodos de protección para prevenir potenciales inestabilidades en baja frecuencia.

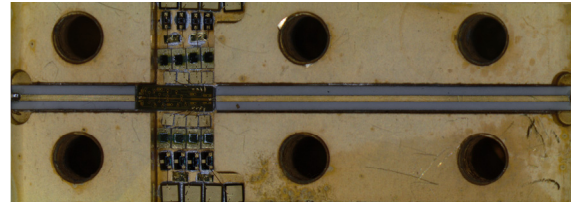


Fig. 10. Detalle del MMIC LNA montado dentro del chasis.

A temperatura criogénica, la medida de ruido se realizó usando la técnica del atenuador frío [12] con un atenuador de 20 dB [13] dentro del criostato. La fuente de ruido se conectó directamente a la entrada del criostato.

Tres unidades, Fig. 11, se han ensamblado y caracterizado con resultados similares en términos de ruido y ganancia a temperatura criogénica. Cada una de las tres unidades tiene una longitud de hilo soldado al MMIC diferente. Además en la última unidad ensamblada se ha colocado el MMIC sobre un pedestal de molibdeno, en lugar de sobre el aluminio del chasis. La constante de dilatación térmica del molibdeno es similar al sustrato en arseniuro de galio del MMIC. De este modo se asegura que el MMIC no sufra estrés mecánico durante el ciclo de enfriamiento.

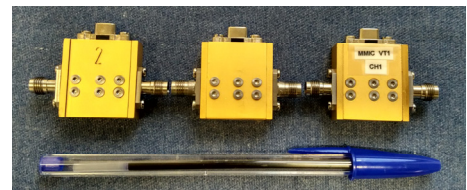


Fig. 11. Tres chasis de los MMIC LNA ensamblados.

La Fig. 12 muestra la medida de la temperatura de ruido y la ganancia asociada para los tres módulos ensamblados a una



temperatura física de 15 K. La disminución de ganancia y aumento de ruido en la parte alta de la banda se debe a la longitud de los hilos de oro de interconexión y a los efectos producidos en la transición entre los conectores coaxiales y las líneas microstrip, puesto que en la medidas en oblea no se aprecia esta degradación de la respuesta. El efecto de los conectores coaxiales podría minimizarse usando transiciones de guía de onda rectangular a microstrip, porque se consiguen mejores pérdidas de retorno.

El amplificador con mejores resultados, chasis #3, tiene una longitud de hilo de 300  $\mu\text{m}$  y presenta una ganancia media de 27.3 dB y una temperatura media de ruido de 18.4 K en toda la banda de frecuencias 33-50 GHz, con un mínimo de 13.5 K a 45 GHz. El consumo de potencia en DC es solo de 4.1 mW,  $V_d = 0.37$  V e  $I_d = 11.2$  mA.

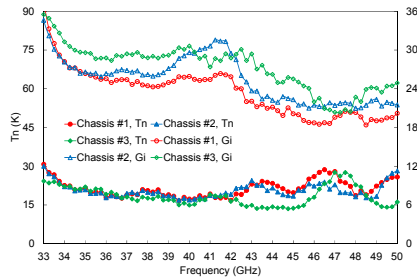


Fig. 12. Medida de temperatura de ruido y ganancia de inserción para los 3 módulos LNA ensamblados a temperatura física de 15 K,  $V_d = 0.37$  V e  $I_d = 11.2$  mA.

### C. Impacto del LNA en el radiómetro

Considerando el efecto que el LNA criogénico produce en el radiómetro en términos de temperatura de ruido del sistema se define la temperatura de operación del radiómetro en la ecuación (1). La temperatura del sistema, incluyendo la temperatura de la antena y del receptor se define en (2). Las contribuciones a la temperatura total del receptor proceden de la opto-mecánica,  $L_{opto}$  en (3), del LNA,  $T_{LNA}$  y  $G_{LNA}$  en (4) y, del módulo posterior (BEM),  $T_{BEM}$  en (4).

Suponiendo un temperatura del BEM de 400 K, pérdidas de la opto-mecánica de 0.5 dB (a 15 K) y, pérdidas de los cables de conexión de 7 dB, se obtiene una temperatura del receptor de 29 K. Según (4), la mayor contribución de ruido al receptor se debe a la temperatura del LNA (18 K). Pero debido a que su ganancia no es muy alta la contribución de los cables y del BEM es importante (11 K). Añadiendo la temperatura de la antena más el "spillover" (6.8 K) y la temperatura captada del cielo (15 K) se obtiene según (1) una temperatura de operación del radiómetro de 50.8 K.

$$T_{op} = T_{cielo} + T_{sis} \quad (1)$$

$$T_{sis} = T_{antena} + T_{spillover} + T'_{rec} \quad (2)$$

$$T'_{rec} = (L_{opto} - 1) \cdot T_f + L_{opto} \cdot T_{rec} \quad (3)$$

$$T_{rec} = T_{LNA} + \frac{T_o \cdot (L_{cable} - 1)}{G_{LNA}} + \frac{L_{cable} \cdot T_{BEM}}{G_{LNA}} \quad (4)$$

## V. CONCLUSIONES

Se presenta el diseño y caracterización de un amplificador criogénico monolítico de bajo ruido y banda ancha desarrollado para aplicaciones de radioastronomía en la banda de 33-50 GHz. El LNA de 4 etapas se basa en una

configuración en fuente común fabricado en la tecnología HEMT metamórfica de GaAs de 70 nm de la fundición OMMIC.

El amplificador presenta una ganancia de 28 dB y un ruido de 145 K en la banda de frecuencias de 33-50 GHz en las medidas en oblea a temperatura ambiente. Cuando el amplificador se enfría a 15 K, la ganancia es de 27 dB y la temperatura de ruido de 18.4 K. El consumo total de potencia DC en criogenia es de solo 4.1 mW.

El impacto del comportamiento del amplificador desde el punto de vista de sistema se ha analizado calculando la temperatura total de operación de un radiómetro.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la fundición OMMIC por la fabricación de los circuitos y a Eva Cuerno por su dedicación en las tareas de ensamblado de los amplificadores.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 referencia CSD2010-00064.

## REFERENCIAS

- [1] Chau-Ching Chiong, Wei-Je Tzeng, Yuh-Jing Hwang, Wei-Ting Wong, Hwei Wang, and Ming-Tang Chen "Design and Measurements of Cryogenic MHEMT IF Low Noise Amplifier for Radio Astronomical Receivers," Proceedings of the 4th European Microwave Integrated Circuits Conference, September 2009, pp. 1-4.
- [2] Christophe Risacher, Erik Sundin, Victor Perez Robles, Miroslav Pantaleev, and Victor Belitsky, "Low Noise and Low Power Consumption Cryogenic Amplifiers for Onsala and Apex Telescopes," 12th GAAS Symposium, Amsterdam 2004.
- [3] P. Kangaslahti, T. Gaier, M. Seiffert, S. Weinreb, D. Harding, D. Dawson, M. Soria, C. Lawrence, B. Hooberman, A. Miller, "Planar Polarimetry Receivers for Large Imaging Array at Q-band," in IEEE 41st European Microwave Conference, October 2011, pp. 934-937.
- [4] Joel Schlee, Niklas Wadefalk, Per-Ake Nilsson, J. Piotr Starski, and Jan Grah, "Cryogenic Broadband Ultra-Low-Noise MMIC LNAs for Radio Astronomy Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, vol. 61, no. 2, pp 871-877.
- [5] Shou-Hsien Weng, Wei-Chu Wang, Hong-Yeh Chang, Chau-Ching Chiong, and Ming-Tang Chen "A Cryogenic 30-50 GHz Balanced Low Noise Amplifiers Using a 0.15- $\mu\text{m}$  MHEMT Process for Radio Astronomy Applications," IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), 2012, pp. 177-179.
- [6] Shou-Hsien Weng, Wei-Chu Wang, Hong-Yeh Chang, Chau-Ching Chiong, and Ming-Tang Chen "An Ultra Low-power Q-band LNA with 50% Bandwidth in WIN GaAs 0.1- $\mu\text{m}$  pHEMT Process," Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 2013, pp. 713-715.
- [7] Shou-Hsien Weng, et al., "Cryogenic Evaluation of A 30-50 GHz 0.15- $\mu\text{m}$  MHEMT Low Noise Amplifier for Radio Astronomy Applications," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., June 2006, pp. 89-92.
- [8] S.-H. Weng, C.-H. Lin, H.-Y. Chang, C.-C. Chiong, "Q-band low noise amplifiers using a 0.15- $\mu\text{m}$  MHEMT process for broadband communication and radio astronomy applications," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., June 2006, pp. 89-92.
- [9] A.H. Akgiray, New Technologies Driving Decade-Bandwidth Radio Astronomy. Ph.D. dissertation. California Institute of Technology. USA. 2013.
- [10] Marian W. Pospieszalsky, "Modeling of Noise Parameters of MESFET's and MODFET's and Their Frequency and Temperature Dependence," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 37, no. 9, September 1989.
- [11] J.L. Cano and J.D. Gallego, "Estimation for Uncertainty in Noise Measurements Using Monte Carlo Analysis," 1st Radionet-FP7 Engineering Forum Workshop, Gothenburg, Sweden, June 2009.
- [12] J.E. Fernández, A noise-temperature measurement system using a cryogenic attenuator. Jet Propulsion Lab. (JPL), Pasadena, CA, TMO Progress Rep. 42-135, Nov. 1998.
- [13] J.L. Cano, N. Waldefalk, and J.D. Gallego-Puyol, "Ultra-Wideband Chip Attenuator for Precise Noise Measurements at Cryogenic Temperatures," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 58, no. 9, Sept. 2010, pp. 2504-2510.